第 64 卷 第 4 期 天 文 学 报 Vol. 64 No. 4
2023 年 7 月 ACTA ASTRONOMICA SINICA Jul., 2023

doi: 10.15940/j.cnki.0001-5245.2023.04.010

北斗三号卫星精密定轨中的光压模型研究*

李鹏杰 张捍卫† 谢孟辛 赵东方

(河南理工大学测绘与国土信息工程学院 焦作 454000)

摘要 对于在轨运行的BDS (BeiDou Navigation Satellite System)卫星, 太阳光压是作用在卫星上主要的非引力摄动. 受多种因素的影响, 太阳光压摄动力难以精确建模, 是BDS卫星精密定轨和轨道预报过程中重要的误差来源. 由于ECOMC (Empirical CODE Orbit Model 1 and 2 Combined)模型兼顾了ECOM1 (Empirical CODE Orbit Model 1)和ECOM2 (Empirical CODE Orbit Model 2)模型的特点, 在模型中引入了较多的待估参数, 使得参数之间存在强相关性. 针对ECOMC模型的这一缺陷, 文中收集了2019年1月至2022年4月武汉大学分析中心提供的BDS-3卫星精密星历, 采用动力学轨道拟合方法得到了ECOMC模型的13个光压参数. 通过对该模型的光压参数进行时间序列分析, 分别给出了BDS-3 IGSO (Inclined Geosynchronous Orbit)和MEO (Medium Earth Orbit)卫星光压模型的参数选择策略. 并利用轨道拟合和轨道预报试验, 验证了光压模型参数选择策略的合理性. 结果表明, 采用改进型ECOMC模型进行BDS-3 IGSO和MEO卫星轨道拟合的效果最佳, 同时, 也能够提升BDS-3 IGSO和MEO卫星中长期轨道预报的精度.

关键词 太阳光压, 精密定轨, BDS-3, 轨道拟合, 轨道预报

中图分类号: P128; **文献标识码**: A

1 引言

太阳光压摄动又称太阳辐射压(Solar Radiation Pressure, SRP)摄动, 是由太阳辐射的光子连续“撞击”卫星表面所产生的力的作用. 对于在轨运行的BDS (BeiDou Navigation Satellite System)卫星, 其所受的非引力摄动主要来源于太阳光压. 受卫星姿态以及卫星表面材料特性的影响, 太阳光压摄动力难以精确地建模, 是BDS卫星精密定轨和轨道预报重要的误差源[1–2].

回顾BDS卫星光压摄动模型的建模历程, 其建模思路主要分为: (I)在经验光压模型的基础上, 利用BDS卫星的精密轨道, 求解经验光压模型的参数并进行分析, 确定出经验光压模型参数的最佳组合方式, 以改善经验光压模型的定轨性能; (II)根据BDS卫星元数据或者由可校正Box-Wing模型估计的卫星几何、光学特性参数, 建立BDS卫星的先验光压模型以提升光压模型的定轨性能.

针对(I)中的建模思想, 文献[3]采用实验设计的方法, 提出了一种适用于BDS GEO (Geostationary Earth Orbit)卫星的经验光压模型, 并通过地基GNSS (Global Navigation Satellite System)技术定轨和卫星激光测距(Satellite Laser Ranging, SLR)技术定轨两种方式, 验证了该光压模型的性能. 文献[4]通过分析ECOM1-9 (Empirical CODE Orbit Model 1, 9表示参数数量)模型的光压参数变化规律, 给出了BDS-2各类轨道卫星的ECOM1经验模

2022-06-15收到原稿, 2022-07-30收到修改稿

*国家自然科学基金项目(42074002、41931075)资助

†zhanwei800@163.com

型的光压参数选择策略, 并提出了在ECOM1-5模型的D方向(即DYB坐标系的D轴方向, 其中D轴为卫星至太阳方向、Y轴为卫星至地球方向与卫星至太阳方向的叉乘、B轴为D与Y轴的叉乘, B轴与D和Y轴构成右手系)上增加周期项, 以吸收BDS-2卫星零偏姿态控制模式下的光压摄动力. 文献[5]采用几何轨道平滑方法反演了ECOM1-9模型的光压参数, 并对参数的时间序列进行了分析. 通过实测数据进行定轨验证, 发现了采用只解算5个光压参数的ECOM1经验光压模型进行BDS卫星定轨的精度最高.

文献[6]采用多模GNSS试验(Multi-GNSS Experiment, MGEX)测站的BDS观测数据进行定轨验证, 得到了扩展型EECOM (Extended Empirical CODE Orbit Model)模型在BDS-2的3种轨道类型卫星定轨中的光压参数选择策略. 在GNSS卫星精密定轨中, ECOM1经验模型还存在着未被模型完全吸收的光压摄动力, 尤其是对于非立方体结构的GNSS卫星[7–9]. 因此(II)中的建模思想被广泛采纳, 考虑到目前BDS-3卫星的元数据并未完全公开, 文献[10]采用假设的BDS卫星几何、光学特性参数建立了具有明确物理意义的先验光压模型, 并联合ECOM1-5模型, 进行BDS卫星精密定轨. 文献[11–13]根据可校正Box-Wing模型估计的相关参数, 建立了先验Box-Wing模型, 并结合ECOM1模型进行定轨实验, 采用该模型获得了比纯经验光压模型更好的定轨效果. 文献[14–15]基于光压摄动的作用机理、卫星表面的光学特性参数和卫星姿态控制模式等, 建立了BDS卫星综合解析模型. 同时, 根据卫星角动量守恒和在轨遥测参数的变化, 提出了在综合解析模型基础上增加常数经验修正项的方法, 使事后精密定轨精度达到了厘米级. 文献[16]根据BDS卫星的元数据, 在Box-Wing模型的基础上建立了BDS-3 MEO (Medium Earth Orbit)卫星的先验光压模型, 并通过定轨验证和SLR技术定轨检验, 发现采用先验光压模型可以显著减小BDS-3 MEO卫星重叠弧段轨道的误差和SLR定轨残差的标准差. 文献[17]从轨道内、外符合精度等方面, 分析了ECOM1-5模型、Box-Wing+ECOM1-5模型和拓展版ECOM模型对BDS IGSO (Inclined Geosynchronous Orbit)与MEO卫星定轨的适用性.

本文根据BDS-3卫星的元数据, 基于Box-Wing模型计算了BDS-3卫星的光压模型先验力. 采用卫星动力学轨道拟合方法得到ECOMC模型的13个光压参数, 并对BDS-3 IGSO卫星和MEO卫星的光压参数进行了时间序列分析, 分别给出了适用于BDS-3 IGSO卫星和MEO卫星的光压参数选择策略. 还通过轨道拟合和轨道预报试验, 验证了BDS-3 IGSO和MEO卫星光压模型参数选择策略的合理性. 由于BDS-3 GEO卫星精密星历没有足够多的积累, 本文暂不将BDS-3 GEO卫星纳入研究范围.

2 BDS-3卫星光压模型

为满足高精度定轨的需要, Beutler等[18]以ROCK模型[19]为先验模型结合精密轨道数据, 建立了ECOM1-9模型. 经过国内外大量学者的研究改进, 该模型出现了众多衍生版本. 该系列模型的基本思想是将光压摄动加速度分解到DYB坐标系的3个坐标轴方向, 并将每个分量采用多项式结合周期函数形式进行描述. 因此, 卫星总的光压摄动加速度$\boldsymbol{a}_{\rm SRP}$可表示为:

$$\boldsymbol{a}_{\rm SRP}=\frac{{\rm AU}^2}{|\boldsymbol{r}_{\rm S}-\boldsymbol{r}|^2}\frac{F_0}{M}\left(a_{\rm D}\cdot\boldsymbol{e}_{\rm D}+a_{\rm Y}\cdot\boldsymbol{e}_{\rm Y}+a_{\rm B}\cdot\boldsymbol{e}_{\rm B}\right)\,, \tag{1}$$

式中, AU为天文单位, ${\rm AU}=1.495978707\times10^{11}$ m; $\boldsymbol{r}_{\rm S}$和$\boldsymbol{r}$分别为太阳和卫星的位置矢量; F_0是通过先验光压模型计算的先验力; M为卫星质量; $\boldsymbol{e}_{\rm D}$、$\boldsymbol{e}_{\rm Y}$和$\boldsymbol{e}_{\rm B}$分别为DYB坐标系3个轴的方向矢量, 其中$\boldsymbol{e}_{\rm D}$为卫星至太阳方向的单位矢量, $\boldsymbol{e}_{\rm Y}$为卫星至地球方向与卫星至太阳方向叉乘的单位矢量, $\boldsymbol{e}_{\rm B}=\boldsymbol{e}_{\rm D}\times\boldsymbol{e}_{\rm Y}$; $a_{\rm D}$、$a_{\rm Y}$和$a_{\rm B}$分别为D、Y和B 3个方向的光压模型分量系数.

在BDS卫星精密定轨中使用的经验型光压模型主要有ECOM1模型(9参数、7参数和5参数)、ECOM2模型及ECOMC模型(13参数)3个大类.

ECOM1-9模型(即早期的ECOM模型)是目前各分析中心使用最多、定轨效果较好的光压模型, 其具体表达式为:

$$
\begin{cases}
a_{\mathrm{D}} = D_0 + D_{\mathrm{C}}\cos u + D_{\mathrm{S}}\sin u\,, \\
a_{\mathrm{Y}} = Y_0 + Y_{\mathrm{C}}\cos u + Y_{\mathrm{S}}\sin u\,, \\
a_{\mathrm{B}} = B_0 + B_{\mathrm{C}}\cos u + B_{\mathrm{S}}\sin u\,,
\end{cases} \tag{2}
$$

式中, u是卫星在轨道面内相对于升交点的角度; D_0、D_{C}、D_{S}、Y_0、Y_{C}、Y_{S}、B_0、B_{C}、B_{S}是ECOM1光压模型的待估参数. 其中, D_0、Y_0和B_0分别为D、Y和B 3个方向的常数项参数, D_{C}和D_{S}为D方向的一阶余弦周期项参数和一阶正弦周期项参数, Y_{C}和Y_{S}为Y方向的一阶余弦周期项参数和一阶正弦周期项参数, B_{C}和B_{S}为B方向的一阶余弦周期项参数和一阶正弦周期项参数. 由于该模型9个待估光压参数之间的强相关性, 在实际BDS卫星定轨应用时一般采用简化ECOM1模型, 即ECOM1-7模型和ECOM1-5模型[4–5].

Arnold等[20]为了消除ECOM1模型在(俄罗斯)全球卫星导航系统(Global Navigation Satellite System, GLONASS)卫星定轨中存在的误差, 在ECOM1光压模型的基础上提出了改进型ECOM2 (Empirical CODE Orbit Model 2)模型. 该模型具体形式如下:

$$
\begin{cases}
a_{\mathrm{D}} = D_0 + \sum\limits_{k=1}^{n_{\mathrm{D}}}\big(D_{2k\mathrm{C}}\cos 2k\Delta u + \\
\qquad D_{2k\mathrm{S}}\sin 2k\Delta u\big)\,, \\
a_{\mathrm{Y}} = Y_0\,, \\
a_{\mathrm{B}} = B_0 + \sum\limits_{k=1}^{n_{\mathrm{B}}}\big[B_{(2k-1)\mathrm{C}}\cos(2k-1)\Delta u + \\
\qquad B_{(2k-1)\mathrm{S}}\sin(2k-1)\Delta u\big]\,,
\end{cases} \tag{3}
$$

式中, $\Delta u = u - u_0$, u_0为太阳在轨道面投影相对于升交点的角度; k为正整数; n_{D}和n_{B}分别为D方向、B方向上的周期项个数; $D_{2k\mathrm{C}}$和$D_{2k\mathrm{S}}$分别为D方向的$2k$阶余弦周期项参数和$2k$阶正弦周期项参数; $B_{(2k-1)\mathrm{C}}$和$B_{(2k-1)\mathrm{S}}$分别为B方向的$2k-1$阶余弦周期项参数和$2k-1$阶正弦周期项参数.

欧洲定轨中心(Centre for Orbit Determination in Europe, CODE)通过大量轨道数据测试, 给出了ECOM2 (D4B1)模型、ECOM2 (D2B1)模型两种方案. ECOM2 (D4B1)模型形式如下:

$$
\begin{cases}
a_{\mathrm{D}} = D_0 + D_{2\mathrm{C}}\cos 2\Delta u + D_{2\mathrm{S}}\sin 2\Delta u + \\
\qquad D_{4\mathrm{C}}\cos 4\Delta u + D_{4\mathrm{S}}\sin 4\Delta u\,, \\
a_{\mathrm{Y}} = Y_0\,, \\
a_{\mathrm{B}} = B_0 + B_{\mathrm{C}}\cos\Delta u + B_{\mathrm{S}}\sin\Delta u\,,
\end{cases} \tag{4}
$$

式中, $D_{2\mathrm{C}}$和$D_{2\mathrm{S}}$为D方向的二阶余弦周期项参数和二阶正弦周期项参数; $D_{4\mathrm{C}}$和$D_{4\mathrm{S}}$为D方向的四阶余弦周期项参数和四阶正弦周期项参数. ECOM2 (D2B1)模型形式如下:

$$
\begin{cases}
a_{\mathrm{D}} = D_0 + D_{2\mathrm{C}}\cos 2\Delta u + D_{2\mathrm{S}}\sin 2\Delta u\,, \\
a_{\mathrm{Y}} = Y_0\,, \\
a_{\mathrm{B}} = B_0 + B_{\mathrm{C}}\cos\Delta u + B_{\mathrm{S}}\sin\Delta u\,.
\end{cases} \tag{5}
$$

此外麻省理工大学(Massachusetts Institute of Technology, MIT)还基于大量轨道数据再分析并结合ECOM1和ECOM2模型的优势, 提出了新的混合光压模型(Empirical CODE Orbit Model 1 and 2 Combined, ECOMC), 即ECOMC模型[21]. 目前, ECOMC模型已应用于GAMIT 10.7 (GPS Analysis at MIT, GAMIT)软件和Ginan软件. 该模型的具体表达式为:

$$
\begin{cases}
a_{\mathrm{D}} = D_0 + D_{\mathrm{C}}\cos\Delta u + D_{\mathrm{S}}\sin\Delta u + \\
\qquad D_{2\mathrm{C}}\cos 2\Delta u + D_{2\mathrm{S}}\sin 2\Delta u + \\
\qquad D_{4\mathrm{C}}\cos 4\Delta u + D_{4\mathrm{S}}\sin 4\Delta u\,, \\
a_{\mathrm{Y}} = Y_0 + Y_{\mathrm{C}}\cos\Delta u + Y_{\mathrm{S}}\sin\Delta u\,, \\
a_{\mathrm{B}} = B_0 + B_{\mathrm{C}}\cos\Delta u + B_{\mathrm{S}}\sin\Delta u\,,
\end{cases} \tag{6}
$$

由上式可知ECOMC模型共有13个光压参数.

2.1　光压模型的先验力计算

对于BDS卫星的光压模型先验力(F_0)主要通过对不同卫星间面质比系数进行换算、采用简化Box-Wing模型计算等方式得到. 根据Box-Wing模型, 可将BDS卫星分为若干个平面分别进行处理, 并将各个面的光压摄动力进行合成, 得到BDS卫星质心总的光压摄动力[22]. 该模型的具体形式如下.

对于卫星星体，平面i受到的光压摄动力$\boldsymbol{f}_i$为[23–24]:

$$\boldsymbol{f}_i = \frac{\Phi_0}{c} A_i \cos\theta_i \left[(\alpha_i + \delta_i) \left(\boldsymbol{s}_i + \frac{2}{3}\boldsymbol{n}_i \right) + 2\rho_i \cos\theta_i \boldsymbol{n}_i \right]; \quad (7)$$

对于太阳能帆板，平面i受到的光压摄动力$\boldsymbol{f}_i$为[23–24]:

$$\boldsymbol{f}_i = \frac{\Phi_0}{c} A_i \cos\theta_i \left[(\alpha_i + \delta_i)\, \boldsymbol{s}_i + 2\left(\frac{\delta_i}{3} + \rho_i \cos\theta_i \right) \boldsymbol{n}_i \right], \quad (8)$$

式中，Φ_0为卫星在一个天文单位处的太阳辐射通量、c为光速、A_i为平面i的表面积; α_i、δ_i和ρ_i分别为平面i的吸收、漫反射和镜面反射系数，且$\alpha_i + \delta_i + \rho_i = 1$; θ_i为平面i的法向矢量$\boldsymbol{n}_i$与卫星至太阳方向矢量$\boldsymbol{s}_i$之间的夹角. BDS-3 IGSO和MEO卫星的几何、光学特性参数见表1，对于该部分内容的描述详见文献[25].

表 1 BDS-3卫星的几何和光学特性参数

Table 1 Geometric and optical characteristic parameters of BDS-3 satellite

Satellite Type	PRN[1]	SV Component[2]	Area/m^2	Absorbed (α)	Difused (δ)	Refected (ρ)
MEO-CAST[4]	C19, C20, C21, C22, C23, C24, C32, C33, C36, C37, C41, C42, C45, C46	$+X$[3]	2.86	0.350	0.000	0.650
		$-X$	2.86	0.615	0.385	0.000
		$\pm Y$	3.63	0.135	0.856	0.000
		$+Z$	2.18	0.920	0.080	0.000
		$-Z$	2.18	0.350	0.000	0.650
		Solar Panels	10.22×2	0.920	0.080	0.000
MEO-SECM[5]	C25, C26, C27, C28, C29, C30, C34, C35, C43, C44	$\pm X$	1.25	0.200	0.800	0.000
		$\pm Y$	3.13	0.200	0.800	0.000
		$\pm Z$	2.59	0.200	0.800	0.000
		Solar Panels	5.40×2	0.920	0.080	0.000
IGSO	C38, C39, C40	$\pm X$	8.496	0.350	0.000	0.650
		$\pm Y$	7.560	0.135	0.865	0.000
		$\pm Z$	4.956	0.870	0.130	0.000
		Solar Panels	17.70×2	0.920	0.080	0.000

[1] Pseudorandom noise.
[2] Satellite vehicle (including Solar Panels).
[3] X, Y and Z are coordinate axes of aster coordinate system.
[4] The MEO satellite manufactured by China Academy of Space Technology (CAST).
[5] The MEO satellite manufactured by Shanghai Engineering Center for Microsatellites (SECM).

2.2 光压模型的参数选择策略分析

本文采用的轨道数据为武汉大学分析中心提供的BDS-3卫星精密星历，其采样间隔为15 min. 轨道数据的时间跨度为2019年年积日第1 d至2022年年积日第100 d. 通过分析轨道拟合获得的BDS-3卫星光压参数变化规律，以确定出光压模型参数最佳组合策略.

在BDS-3卫星轨道拟合中采用弧段长度为1 d

的卫星星历数据作为虚拟观测值进行动力学轨道拟合，求解每颗卫星的初始状态参数、ECOMC模型的光压参数. 在轨道拟合中考虑太阳和月球等行星引力摄动力、太阳光压摄动力、相对论效应、地球固体潮汐和海洋潮汐等的影响. 轨道拟合中使用的地球重力场模型为GOCO06s (Gravity Observation Combination 06s)模型[26]. BDS-3 IGSO和MEO卫星采用ECOMC光压模型拟合的光压参数时间序列如图1和图2所示. 图中横坐标为简化儒略日(Modified Julian Day, MJD)表示的时间, 纵坐标为光压参数与光压模型先验加速度(F_0/M)的乘积, 单位为$\mathrm{m \cdot s^{-2}}$.

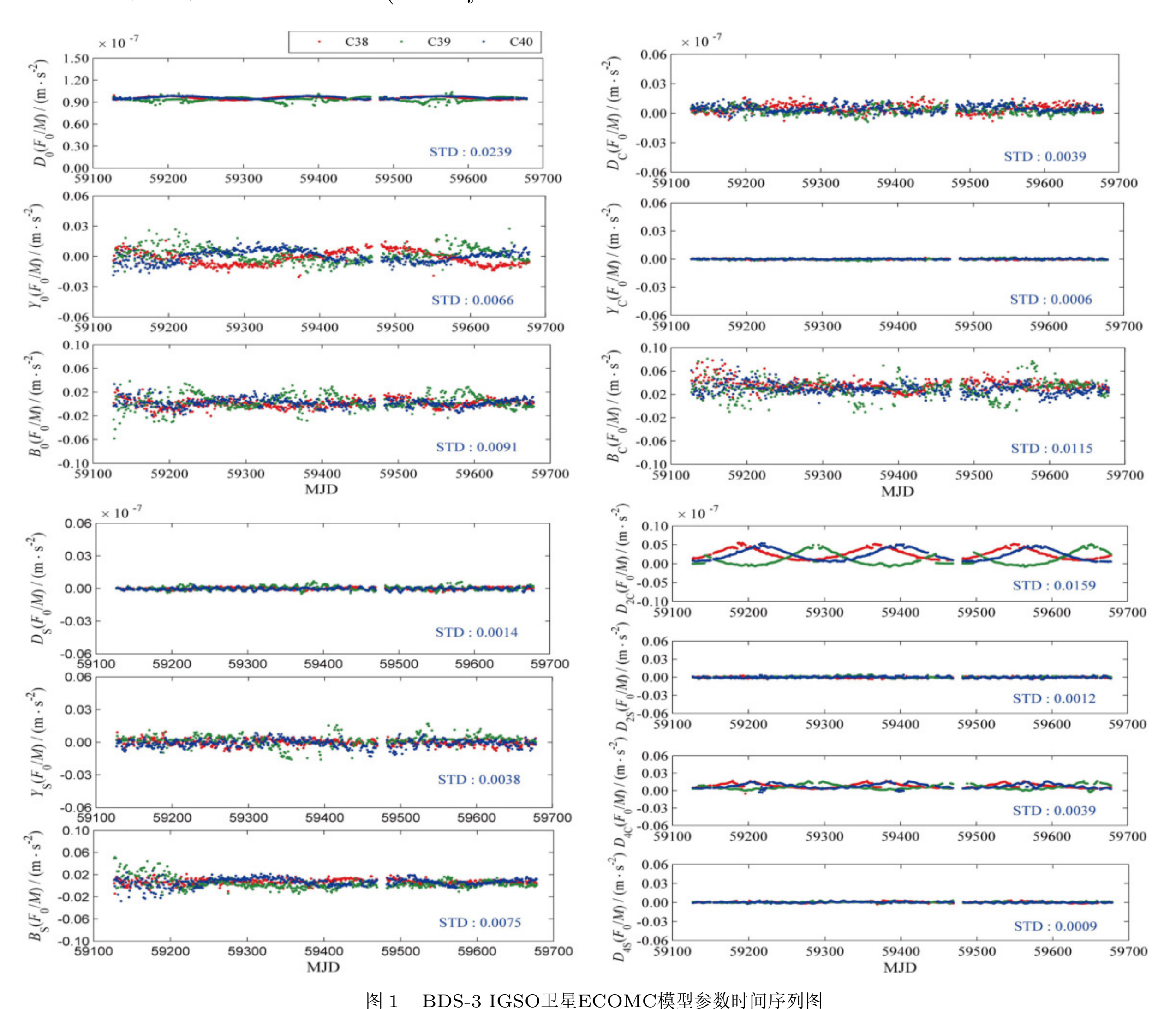


图 1　BDS-3 IGSO卫星ECOMC模型参数时间序列图

Fig. 1　Time sequence diagram of the ECOMC model parameters for the BDS-3 IGSO satellite

图1为BDS-3 IGSO卫星ECOMC光压模型常数项、周期项光压参数的时间序列图和参数值对应的标准差(Standard Deviations, STD). 从图1中光压参数变化规律和参数值的标准差可以看出, 在采用ECOMC模型进行轨道拟合的结果中, BDS-3 IGSO卫星的周期项光压参数D_C、D_S、D_2S、D_4C、D_4S、Y_C和Y_S的值较为稳定(STD小于0.004), 且参数值趋近于0, 无明显周期性变化趋

势. 因此, 可以推断D_{C}、D_{S}、$D_{2\mathrm{S}}$、$D_{4\mathrm{C}}$、$D_{4\mathrm{S}}$、Y_{C}和Y_{S}参数项对ECOMC模型整体的贡献相对较小. 综合轨道拟合和轨道预报的实际效果, 在采用ECOMC模型进行BDS-3 IGSO卫星定轨应用中, 可以考虑只估计D_0、Y_0、B_0、D_{C}、D_{S}、B_{C}、B_{S}和$D_{2\mathrm{C}}$ 8个光压参数, 即ECOMC-8模型.

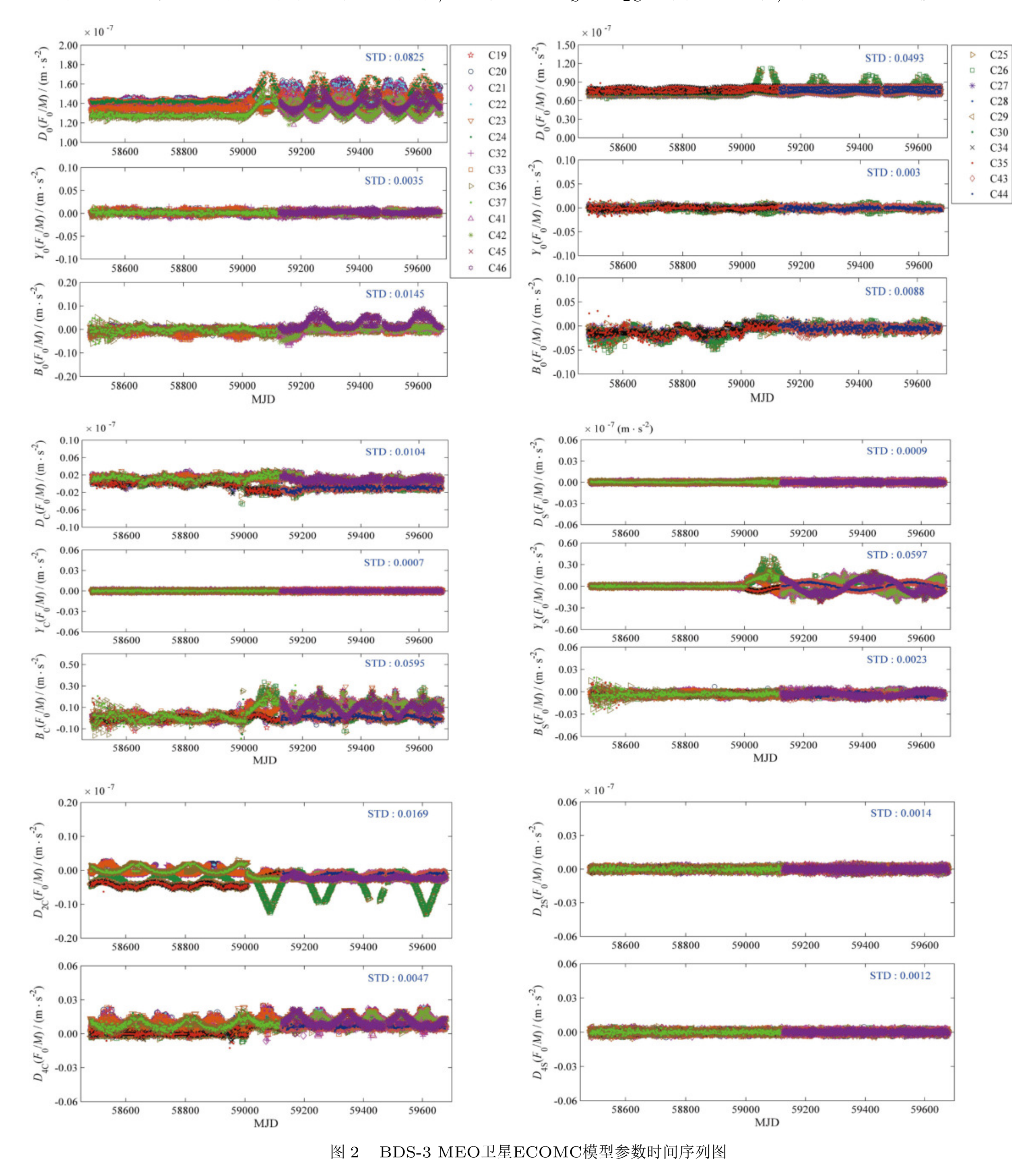


图 2 BDS-3 MEO卫星ECOMC模型参数时间序列图

Fig. 2 Time sequence diagram of the ECOMC model parameters for the BDS-3 MEO satellite

图2中给出了BDS-3 MEO-CAST和BDS-3 MEO-SECM卫星ECOMC光压模型常数项、周期项光压参数的时间序列以及光压参数值的标准差. 从图2中光压参数时间序列可以看出, BDS-3两类MEO卫星光压参数都随时间呈现出一定的变化规律. 其中, 对于光压模型的常数参数(D_0、Y_0和B_0), MEO-CAST卫星的D_0、B_0参数波动较大, 且D_0参数表现出了周期性. 相比MEO-CAST卫星, MEO-SECM卫星的D_0、B_0参数波动相对较小. 对于光压模型的周期项参数, BDS-3两类MEO卫星的$D_{\rm S}$、$D_{\rm 2S}$、$D_{\rm 4S}$和$Y_{\rm C}$光压参数值较为恒定(STD小于0.002), 无明显周期性变化趋势, 且参数值趋近于0. 因此, 可以推断$D_{\rm S}$、$D_{\rm 2S}$、$D_{\rm 4S}$和$Y_{\rm C}$参数项对ECOMC模型整体的贡献较小, 其对轨道拟合结果产生的影响可以忽略不计. 在实际BDS-3 MEO卫星定轨应用中, 可以考虑只估计ECOMC模型3个方向上的常数参数D_0、Y_0和B_0以及周期项参数$D_{\rm C}$、$Y_{\rm S}$、$B_{\rm C}$、$B_{\rm S}$、$D_{\rm 2C}$和$D_{\rm 4C}$, 即ECOMC-9模型.

3 结果分析

为了验证2.2节中提出的BDS-3 IGSO、MEO卫星ECOMC模型光压参数选择策略的合理性, 本文选取了2022年年积日第105 d至第107 d的BDS-3卫星精密星历作为虚拟观测值, 研究不同光压模型对BDS-3卫星轨道拟合和预报的影响, 并通过轨道拟合精度和预报精度两个方面进行评定. 由于各天的数据处理结果基本一致, 因此选取2022年年积日第107 d的处理结果进行展示. 卫星轨道拟合和预报的步骤如下: 首先, 对给定卫星初始状态下的轨道参数进行积分, 得到卫星轨道初始值; 然后, 将卫星精密星历作为虚拟观测值, 建立卫星动力学轨道拟合的观测方程, 并对观测方程进行最小二乘估计得到卫星初始状态下轨道参数和动力学参数的改正值; 最后, 对改正后的初始状态重新进行积分, 即可得到卫星的拟合轨道和预报轨道.

3.1 轨道拟合精度

表2中给出了在BDS-3卫星轨道拟合数据处理过程中所采用的光压模型及其参数组合. 本文利用表2中的光压模型进行了BDS-3 IGSO和MEO卫星轨道拟合数据处理, 在数据处理过程中, 使用了相同的卫星初始轨道参数以及相同的其他摄动力模型. 对于拟合弧段长度为24 h的拟合轨道, 每5 min输出一个拟合结果. 不同光压模型得到的IGSO和MEO卫星轨道拟合结果精度见图3和图4.

从图3和图4中可以看出, 使用ECOMC模型进行轨道拟合的效果最好, BDS-3 IGSO和MEO卫星轨道拟合残差在径向(Radial)、切向(Along)和法向(Cross)方向上均优于2 cm. 由于ECOM1-5模型和ECOM1-7模型缺少D方向上的高阶周期项, 使得IGSO和MEO卫星轨道拟合结果的稳定性和拟合精度相对较差. 相比ECOM1和ECOM2模型, ECOMC模型明显提升了MEO卫星在径向和法向上的拟合精度. 由于ECOMC模型待估参数较多, 且参数之间存在强相关性, 对于IGSO和MEO卫星分别使用本文2.2节中ECOMC-8模型、ECOMC-9模型进行轨道拟合, 获得了与使用ECOMC模型相同的拟合效果.

表 2 BDS-3卫星的光压模型参数组合

Table 2 The combined SRP model parameters of BDS-3 satellite

Model Name	SRP Parameters
ECOMC	D_0, Y_0, B_0, $D_{\rm C}$, $D_{\rm S}$, $Y_{\rm C}$, $Y_{\rm S}$, $B_{\rm C}$, $B_{\rm S}$, $D_{\rm 2C}$, $D_{\rm 2S}$, $D_{\rm 4C}$, $D_{\rm 4S}$
ECOMC-8 (IGSO)	D_0, Y_0, B_0, $D_{\rm C}$, $D_{\rm S}$, $B_{\rm C}$, $B_{\rm S}$, $D_{\rm 2C}$
ECOMC-9 (MEO)	D_0, Y_0, B_0, $D_{\rm C}$, $Y_{\rm S}$, $B_{\rm C}$, $B_{\rm S}$, $D_{\rm 2C}$, $D_{\rm 4C}$
ECOM1-5	D_0, Y_0, B_0, $B_{\rm C}$, $B_{\rm S}$
ECOM1-7	D_0, Y_0, B_0, $D_{\rm C}$, $D_{\rm S}$, $B_{\rm C}$, $B_{\rm S}$
ECOM2 (D2B1)	D_0, Y_0, B_0, $B_{\rm C}$, $B_{\rm S}$, $D_{\rm 2C}$, $D_{\rm 2S}$
ECOM2 (D4B1)	D_0, Y_0, B_0, $B_{\rm C}$, $B_{\rm S}$, $D_{\rm 2C}$, $D_{\rm 2S}$, $D_{\rm 4C}$, $D_{\rm 4S}$

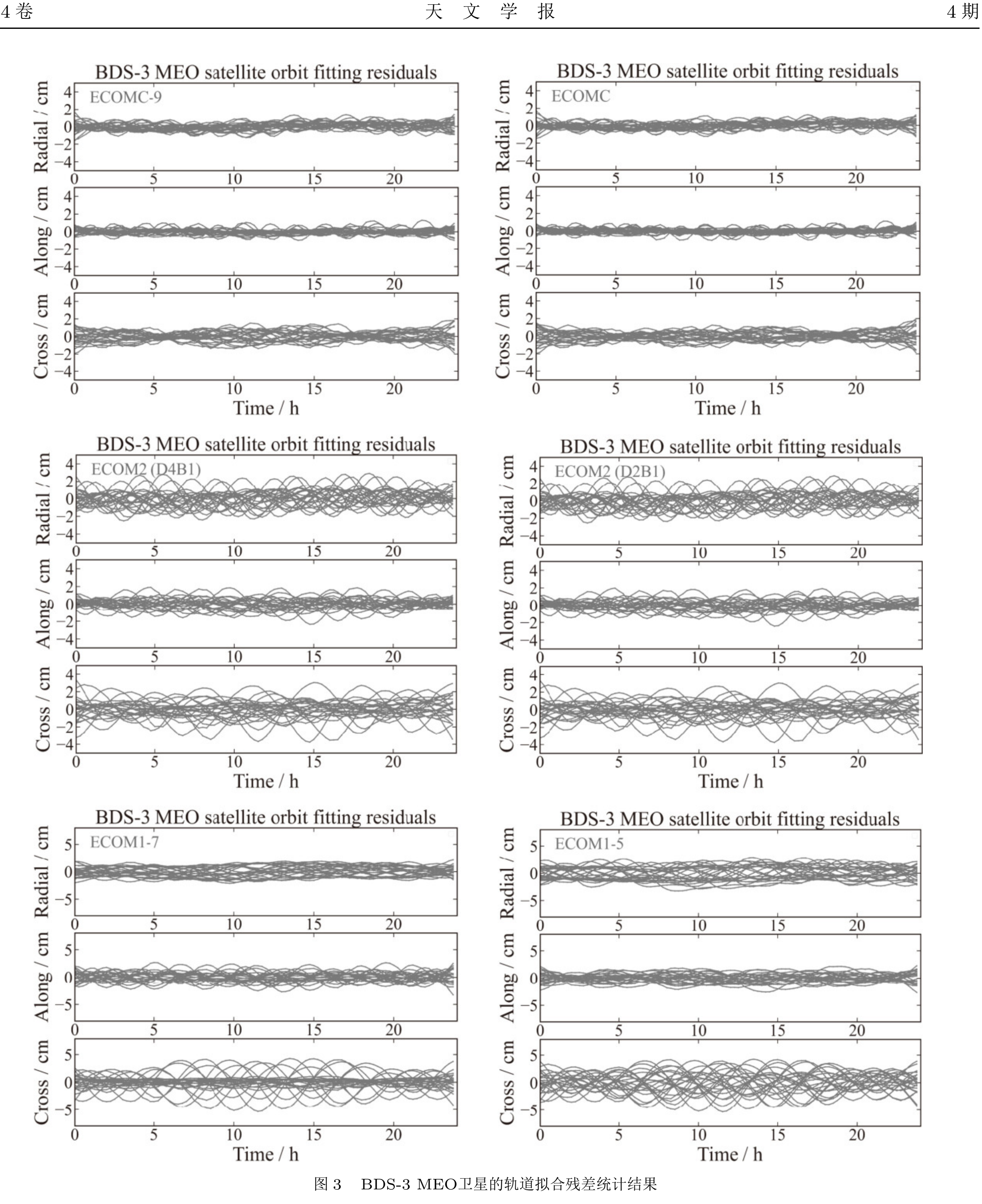


图 3 BDS-3 MEO卫星的轨道拟合残差统计结果

Fig. 3 The statistical results of orbit fitting residuals for BDS-3 MEO satellite

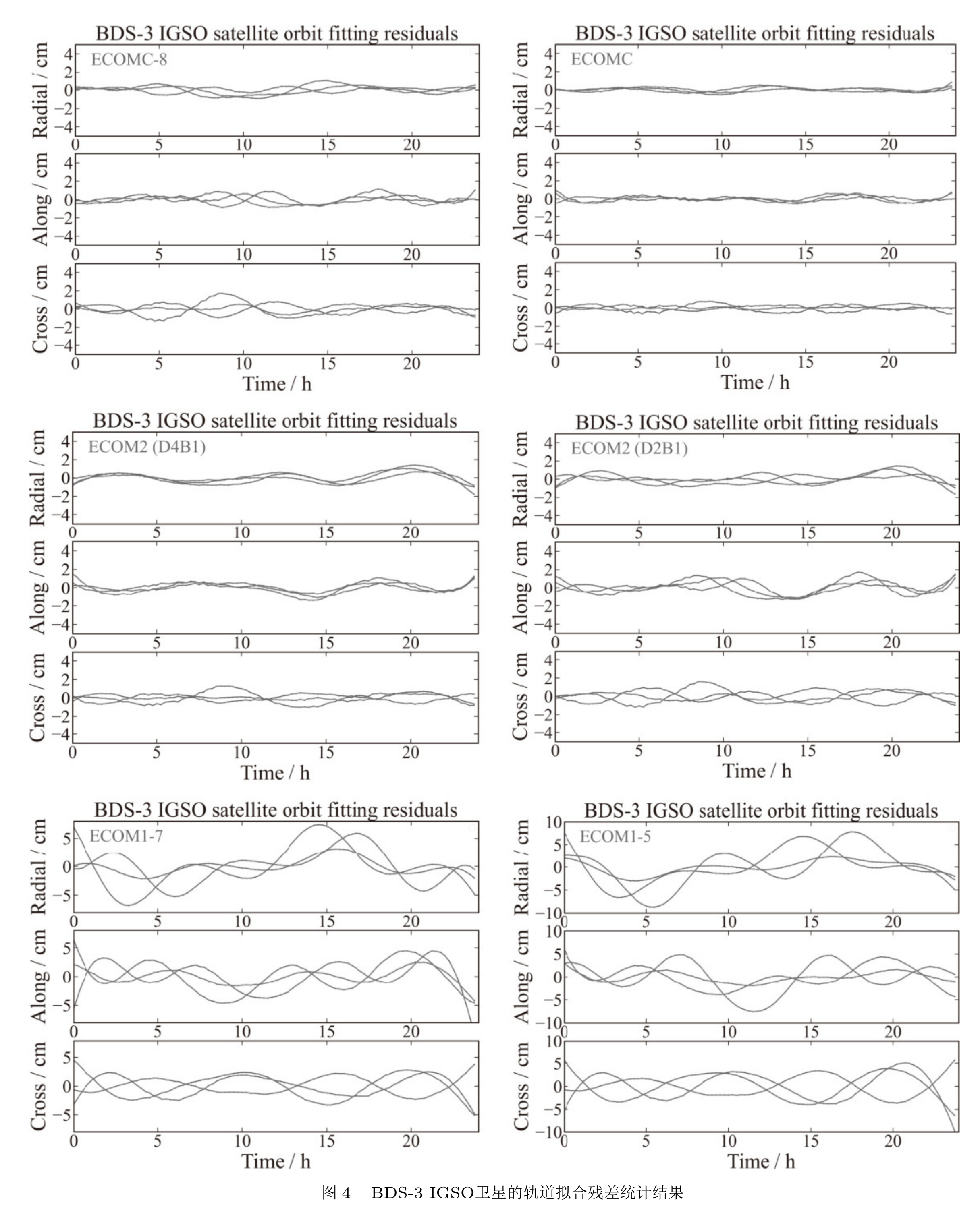


图 4 BDS-3 IGSO卫星的轨道拟合残差统计结果

Fig. 4 The statistical results of orbit fitting residuals for BDS-3 IGSO satellite

3.2　轨道预报精度

初始轨道和光压模型参数选择对轨道预报影响很大，而其他的动力学模型误差对轨道预报的影响可以忽略不计. 因此，本文采用中长期(15 d)、中期(7 d)和短期(1 d) 3种模式进行BDS-3 IGSO卫星和MEO卫星轨道预报，以验证ECOMC模型光压参数选择策略的合理性. 在轨道预报数据处理中，IGSO卫星采用了ECOMC模型和ECOMC-8光压模型，MEO卫星采用了ECOMC模型和ECOMC-9光压模型，卫星初始轨道参数以及其他摄动力模型均相同. 预报轨道通过与对应弧段独立的卫星精密轨道进行比较以评定预报精度，评定指标为预报轨道与精密轨道互差在径向、切向和法向的RMS (Root Mean Square)值. 表3中给出了BDS-3 IGSO卫星轨道预报精度的统计结果. 表4中给出了BDS-3 MEO卫星轨道预报精度的统计结果，其中各颗卫星预报1 d、7 d和15 d的轨道精度统计结果如图5、图6和图7所示.

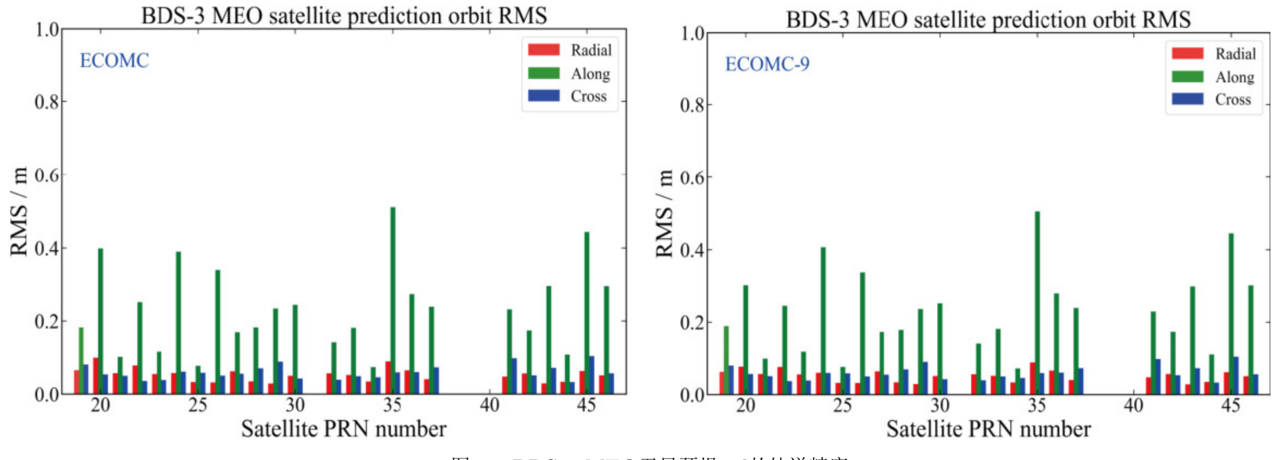


图 5　BDS-3 MEO卫星预报1 d的轨道精度

Fig. 5　The accuracy of 1 d prediction orbit for BDS-3 MEO satellite

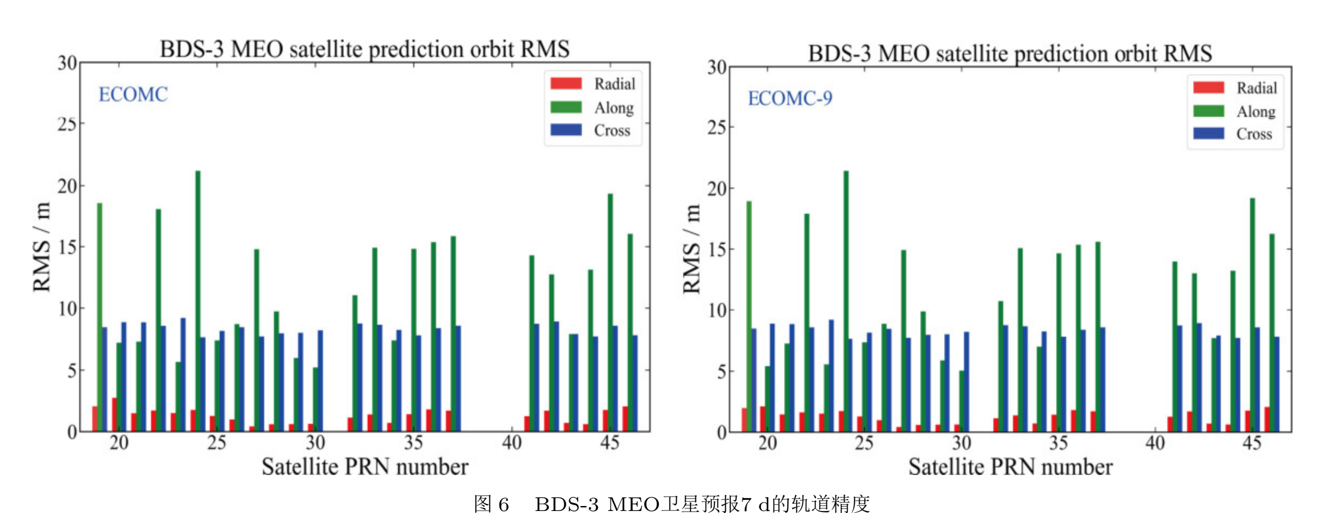


图 6　BDS-3 MEO卫星预报7 d的轨道精度

Fig. 6　The accuracy of 7 d prediction orbit for BDS-3 MEO satellite

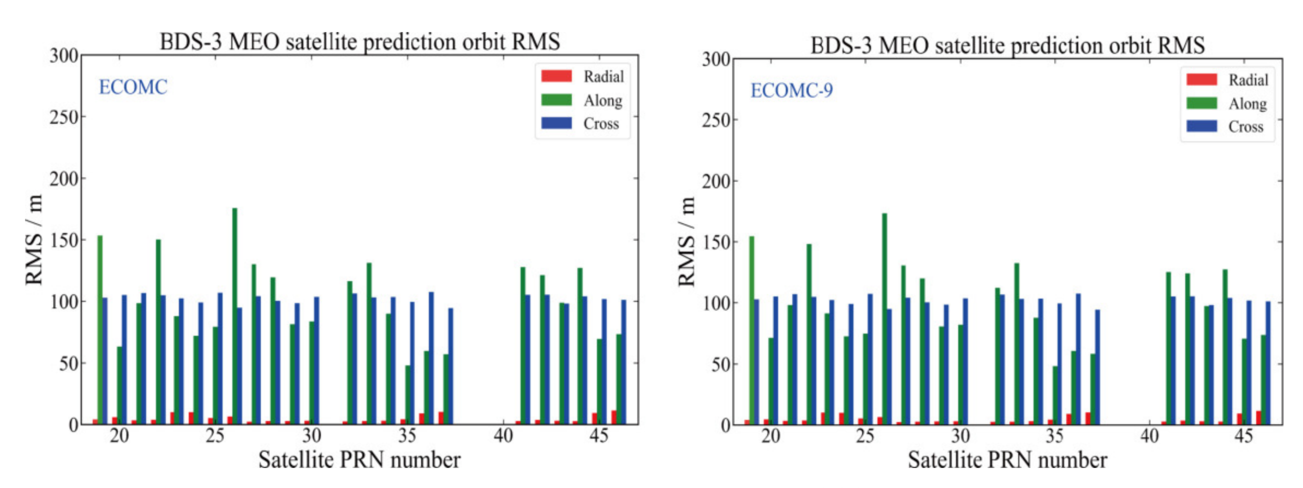


图 7 BDS-3 MEO卫星预报15 d的轨道精度

Fig. 7 The accuracy of 15 d prediction orbit for BDS-3 MEO satellite

表 3 BDS-3 IGSO卫星的预报轨道精度统计结果

Table 3 The statistical results of prediction orbit accuracy of BDS-3 IGSO satellite

Model Type		1 d prediction/m			7 d prediction/m			15 d prediction/m		
		Radial	Along	Cross	Radial	Along	Cross	Radial	Along	Cross
ECOMC	C38	2.267	11.612	0.392	16.522	492.203	9.528	38.066	2304.486	140.588
	C39	2.038	10.834	0.182	13.132	411.585	11.370	27.472	1953.874	142.261
	C40	2.115	10.855	0.195	14.720	444.769	13.108	32.009	2124.860	151.690
	Mean	2.142	11.107	0.274	14.856	450.735	11.429	32.804	2132.550	144.929
ECOMC-8	C38	2.477	12.672	0.363	18.041	532.935	9.709	41.408	2491.409	140.900
	C39	1.719	9.120	0.155	11.078	350.222	11.432	23.485	1680.316	142.405
	C40	1.976	10.133	0.187	13.733	417.641	13.000	29.805	1999.992	151.490
	Mean	2.081	10.746	0.252	14.569	440.114	11.459	32.427	2084.110	145.007

表 4 BDS-3 MEO卫星的预报轨道精度统计结果

Table 4 The statistical results of prediction orbit accuracy of BDS-3 MEO satellite

Model Type		1 d prediction/m			7 d prediction/m			15 d prediction/m		
		Radial	Along	Cross	Radial	Along	Cross	Radial	Along	Cross
ECOMC	Min	0.034	0.073	0.046	0.622	5.219	8.205	4.246	48.085	99.504
	Max	0.089	0.511	0.059	1.749	21.184	7.653	6.424	175.388	94.810
	Mean	0.056	0.262	0.062	1.444	13.085	8.356	5.959	106.105	102.597
ECOMC-9	Min	0.033	0.072	0.046	0.626	5.057	8.204	4.289	48.32	99.526
	Max	0.088	0.505	0.059	1.724	21.424	7.646	6.437	173.149	94.854
	Mean	0.054	0.258	0.062	1.387	13.041	8.353	5.911	105.944	102.594

从表3中的统计结果可以看出, 对于IGSO卫星中期(7 d)和中长期(15 d)预报轨道, 使用ECOMC-8模型进行预报, 7 d和15 d的预报轨道在切向的RMS均值分别为440.114 m和2084.110 m; 使用ECOMC模型进行轨道预报, 7 d和15 d的预报轨道在切向的RMS均值分别为450.735 m和2132.550 m. 相比ECOMC模型, ECOMC-8模型在切向上的预报精度有一定程度的提升.

由表4和图5–7可得, 对于MEO卫星短期(1 d)轨道预报, 使用ECOMC和ECOMC-9模型分别进行轨道预报, 两种光压模型的预报轨道在径向、切向和法向的RMS均值差异在1 cm以内. 对于MEO卫星中期(7 d)和中长期(15 d)轨道预报, 使用ECOMC模型进行预报, 7 d和15 d的预报轨道在径向的RMS均值分别为1.444 m和5.959 m、切向RMS均值分别为13.085 m和106.105 m; 使用ECOMC-9模型进行轨道预报, 7 d和15 d的预报轨道在径向的RMS均值分别为1.387 m和5.911 m、切向的RMS均值分别为13.041 m和105.944 m. 相比ECOMC模型, ECOMC-9模型在径向和切向上的预报精度都有一定程度的提升.

4 结论

本文通过对BDS卫星精密定轨中常用的光压模型进行研究, 利用BDS-3卫星元数据, 基于Box-Wing模型计算了卫星的光压模型先验力. 采用卫星动力学轨道拟合方法得到了ECOMC模型的13个光压参数, 并对BDS-3 IGSO卫星和MEO卫星的光压参数进行了时间序列分析, 分别给出了适用于BDS-3 IGSO卫星和MEO卫星的光压参数选择策略. 利用轨道拟合和轨道预报试验, 对BDS-3 IGSO卫星和MEO卫星光压参数选择策略的合理性进行了验证. 结果表明:

(1)对于BDS-3 MEO卫星, 采用只包含常数参数D_0、Y_0和B_0以及周期项参数D_C、Y_S、B_C、B_S、D_{2C}和D_{4C}的ECOMC-9模型进行轨道拟合, 能够获得与使用ECOMC模型相同的拟合效果. 同时, 使用ECOMC-9模型进行中长期(15 d)和中期(7 d)轨道预报, 对MEO卫星轨道的径向和切向的预报精度有一定的改善作用;

(2)采用只估计D_0、Y_0、B_0、D_C、D_S、B_C、B_S和D_{2C} 8个光压参数的ECOMC-8模型进行BDS-3 IGSO卫星轨道拟合和轨道预报, 对于轨道拟合结果, 3颗IGSO卫星的轨道拟合残差在径向、切向和法向上都在2 cm以内. 对于7 d以上的轨道预报, 使用ECOMC-8模型的切向预报精度有一定程度的提升.

参考文献

[1] Montenbruck O, Eberhard G. Satellite Orbits: Models, Methods and Applications. 王家松, 祝开建, 胡小工, 译. 北京: 国防工业出版社, 2012: 73-79
[2] 王小亚, 胡小工, 蒋虎, 等. 导航卫星精密定轨技术. 北京: 科学出版社, 2017: 118-119
[3] Liu J H, Gu D F, Ju B, et al. AdSpR, 2016, 57: 234
[4] 毛悦, 宋小勇, 贾小林, 等. 测绘学报, 2017, 46: 1812
[5] 王琰, 郭睿, 张传定, 等. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43: 194
[6] 鞠冰, 昌婋, 谷德峰, 等. 国防科技大学学报, 2018, 40: 86
[7] Montenbruck O, Steigenberger P, Hugentobler U. JGeod, 2015, 89: 283
[8] Zhao Q L, Chen G, Guo J, et al. JGeod, 2018, 92: 109
[9] Bury G, Zajdel R, Sośnica K. GPS Solutions, 2019, 23: 1
[10] Zhao Q H, Wang X Y, Hu X G, et al. EGU General Assembly Conference Abstracts. Vienna: EGU General Assembly, 2016, 18: EGU2016-16562-1
[11] Guo J, Chen G, Zhao Q L, et al. GPS Solutions, 2017, 21: 511
[12] Duan B B, Hugentobler U, Selmke I. AdSpR, 2019, 63: 1803
[13] Yan X Y, Liu C C, Huang G W, et al. RemS, 2019, 11: 1605
[14] 陈秋丽, 杨慧, 陈忠贵, 等. 测绘学报, 2019, 48: 169
[15] Chen Q L, Yang H, Chen Z G, et al. JGGS, 2020, 3: 45
[16] Li X X, Yuan Y Q, Zhu Y T, et al. GPS Solutions, 2020, 24: 1
[17] 赵辉, 金双根, 罗鹏, 等. 大地测量与地球动力学, 2022, 42: 9
[18] Beutler G, Brockmann E, Gurtner W, et al. ManGe, 1994, 19: 367
[19] Fliegel H F, Gallini T E. JSpRo, 1996, 33: 863
[20] Arnold D, Meindl M, Beutler G, et al. JGeod, 2015, 89: 775
[21] 綦仁海, 常春涛, 党亚民, 等. 大地测量与地球动力学, 2021, 41: 342
[22] 赵群河. 北斗卫星导航系统高精度太阳辐射压模型确定研究. 北京: 中国科学院大学, 2017: 44-52

[23] Fliegel H F, Gallini T E, Swift E R. JGRB, 1992, 97: 559

[24] Montenbruck O, Steigenberger P, Darugna F. AdSpR, 2017, 59: 2088

[25] Zhao Q L, Guo J, Wang C, et al. Satellite Navigation, 2022, 3: 2

[26] Kvas A, Brockmann J M, Krauss S, et al. ESSD, 2021, 13: 99

A Study of Solar Radiation Pressure Model in BDS-3 Precise Orbit Determination

LI Peng-jie ZHANG Han-wei XIE Meng-xin ZHAO Dong-fang

(School of Surveying and Land Information Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000)

Abstract For the BDS (BeiDou Navigation Satellite System) satellites, the solar radiation pressure is the major non-gravitational perturbation the satellites suffer. Due to the influence of multiple factors, accurate modeling the solar radiation pressure acting on these satellites is difficult to accomplish. The solar radiation pressure perturbation is an essential source of error in the precise orbit determination (POD) and orbit prediction processes of the BDS satellites. As the ECOMC (Empirical CODE Orbit Model 1 and 2 Combined) model adopts the advantageous features of the ECOM1 (Empirical CODE Orbit Model 1) model and the ECOM2 (Empirical CODE Orbit Model 2) model, a greater number of parameters have been introduced into the model, leading to strong correlation between the ECOMC model parameters. In response to the deficiency of the ECOMC model, the authors collected the BDS-3 satellite precise ephemeris data that was provided by Wuhan University (WHU) from January 2019 to April 2022. And by these ephemeris data, the ECOMC model's 13 parameters were obtained through the dynamic orbit fitting method. By conducting these time sequence diagrams analysis of the ECOMC model parameters, this thesis affords the selection strategies of the solar radiation pressure parameters of the ECOMC model for BDS-3 inclined geosynchronous orbit (IGSO) and medium earth orbit (MEO) satellite. And the rationality of the selection strategies of the solar radiation pressure parameters for the ECOMC model was verified, by orbit fitting and orbit prediction experiments. The results show that using the improved ECOMC model gains the best orbit fitting effects for BDS-3 IGSO and MEO satellite and can also enhance the accuracy of medium and long-term orbit prediction of BDS-3 IGSO and MEO satellite.

Key words solar radiation pressure, precise orbit determination, BDS-3, orbit fitting, orbit prediction